

高耐熱ダイアタッチに向けた還元溶媒によるCu焼結接合技術の検討

大阪大学大学院 工学研究科
知能・機能創成工学専攻 菅沼研究室 吉川 弘起

1 はじめに

今日、省エネルギー社会の実現に向けて、電力変換機器の性能向上が強く望まれている。社会インフラから身の回りの電化製品まで電子機器では、電力の送電・変電を行う度に大きな電力ロスを伴い、ここでのロスを低減させるためにパワー半導体が活躍している^[1]。電力変換機器として不可欠なデバイスであるパワー半導体の素子として長らくSiが利用されてきたが、Siパワー半導体の電力変換効率は限界に達している。近年、SiCやGaN等のワイドバンドギャップ(WBG)半導体の出現でパワー半導体の大幅な高効率化が可能となった。しかし、大電流化や小型化からパワー半導体の動作温度は、従来の半導体実装材料の耐熱温度を超える200℃以上になると予想され、高温下において優れた性能と信頼性を有する実装技術が要求される^[2]。特にチップと基板間の接合材(ダイアタッチ)は、チップからの熱を逃がし、チップと基板間の熱応力に耐えることが必要とされ、パワー半導体の性能と信頼性に最も大きく影響を及ぼす箇所である。現在、高耐熱ダイアタッチの実現に向けて、金属微細粒子の焼結現象を利用した焼結接合技術が、従来のはんだ接合に代わる接合技術として有力視されている。特にCuは優れた電氣的・熱的特性を有しつつ、価格競争力に優れているため、WBG半導体の高温動作を実用化させる材料として検討されている。しかし、過去のCu焼結接合例は、還元ガスや過大な加圧が必須となり、ハンドリングに優れないナノ粒子を使用するため、量産を視野に入れた際に煩雑な接合条件が大きな障害になる^[3-4]。本研究では、煩雑な接合条件を改善するため、ナノ粒子よりもハンドリングと価格競争力に優れるサブマイクロ粒子を用い、還元作用を示すポリエチレングリコール(PEG)を溶媒に選定することで、ペーストの構成材のみでCu焼結接合が可能な技術開発を目指す^[5]。

2 実験試料および評価方法

実験試料には、平均粒径150nmのCuサブマイクロ粒子(三井金属・彦島製錬)をフィラーとして、分子量の異なる3種類のPEG(平均分子量:200、300、400)を溶媒として選定する。Cuペーストは、フィラーと溶媒を指定の配合比で混合し、2分間の攪拌(キーンエンス、HM-500)を行い作製する。

作製したCuペーストの温度特性をTG/DTA(Thermogravimetric/Differential Thermal Analysis)測定(NETZSCH、2000SE)で評価する。加熱プロファイルは、RTから300℃まで昇温速度25℃/minで加熱後、1時間加熱保持する接合プロファイルを模したプロファイルを用いる。接合後のペーストの断面構造と接合強度は、FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscope)(日立ハイテクノロジーズ、SU8020)による断面観察、およびせん断試験にてそれぞれ評価する。評価サンプルの作製手順と模式図を図1に示す。ペーストの電気抵抗値の測定には、高耐熱プリント配線基板(関西電子工業)にペーストを焼成後、4端子法で体積抵抗率を測定し評価する。ペーストの高温環境下における長期寿命特性評価には、ペーストをSBD(Schottky Barrier Diode)(TO-247)のダイアタッチとして使用し評価する。評価サンプルは、SiC SBDチップ(1.85mm×1.85mm×0.235mm)(ローム)とCuリードフレームをペーストで接合し、直径350μmのアルミワイヤーでボンディング後、高耐熱樹脂(日本触媒)を用いてトランスファーモールドし作製する(図2)^[6]。作製した評価サンプルは、小型冷熱衝撃装置(エスペック、TSE-11-A-S)を使用し温度サイクル試験で評価する。温度サイクル試験は、-50~250℃の温度範囲で、各温度30分保持したものを1サイクルとし、1000サイクル行う。試験後のサンプルは、過渡熱抵抗測定(Mentor Graphics、T3Ster)、FE-SEMによる断面観察によって評価する。



図1 接合サンプルの作製手順および模式図

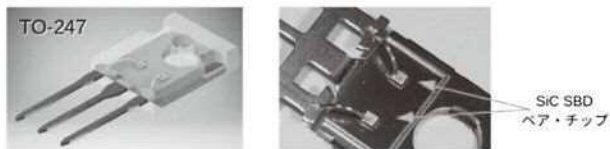


図2 TO-247 SBDサンプル写真⁷⁾

3 実験結果および考察

3.1 溶媒分子量と配合比の最適化

接合特性に対する溶媒分子量の影響を調査するために、Cuペーストの温度特性を調査する。各分子量のPEGをCu粒子に対して18wt.%の割合で混合したペーストのTG/DTA測定の結果を図3に示す。DTA測定結果に注目すると、いずれのペーストも250~270°Cの間で明確な発熱ピークが観察できる。この発熱ピークは、Cu粒子表面に存在する酸化層が、PEGの分解反応によって生成されたCOと還元されることに起因する。TG測定結果に着目すると、PEG200を使用したペーストでは、1時間の加熱保持中に僅かながら質量増加が生じていることが確認できる。一方で、PEG300とPEG400を使用したペーストでは、質量増加は確認できない。分子量によって質量変化に差異が生じた原因として、溶媒の沸点が挙げられる。使用したPEGの沸点は、分子量の小さい順にそれぞれ240°C、310°C、360°Cである。接合プロセスを模したプロファイルの加熱温度は300°Cであるため、PEG200の場合、加熱温度が溶媒の沸点以上の温度になるため、加熱中に溶媒が完全に気化する。それに対して、PEG300とPEG400では、加熱温度より溶媒の沸点が高いため、加熱中に溶媒が完全に気化しない。また、PEG300の沸点は、加熱温度より高いだけでなくPEG400の沸点より低温であるため、焼結体中の溶媒の残渣がPEG400に比べて少なくなると考えられる。従って、PEG300を溶媒として使用することで、接合プロセス中に溶媒が完全に気化することなく分解反応を起こし、粒子表面の酸化層を還元し、焼結体中の溶媒の残渣を減らすことが可能なため、高い焼結状態を実現できると予想される。

次に、各分子量のPEGをCu粒子に対して、

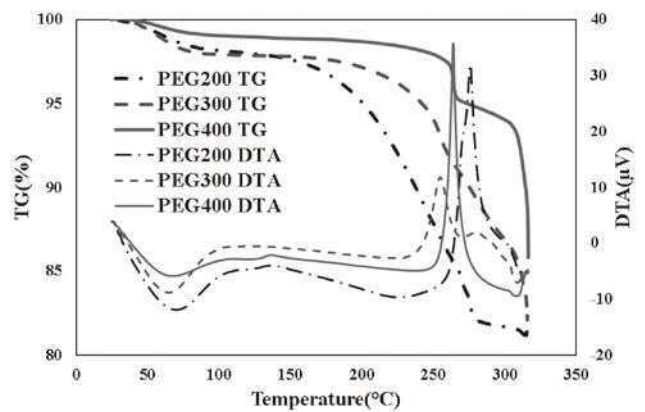


図3 CuペーストのTG/DTA測定結果

6~22wt.%で配合し、接合サンプルのせん断強度から、最適なPEG分子量および溶媒配合比を選定する。接合サンプルは、N₂雰囲気下で室温から300°Cまで25°C/minの昇温速度で加熱し、1時間の加熱保持をして作製する。図4に溶媒の配合比を変化させた時の接合サンプルのせん断試験結果を示す。それぞれのせん断試験結果から、PEG200を使用したペーストでは10wt.%にて24MPa、PEG300を使用したペーストで12wt.%にて27MPa、PEG400を使用したペーストでは18wt.%にて20MPaの最大平均せん断強度が確認できる。中でも、PEG300を12wt.%配合したペーストでは、平均せん断強度が27MPaと全てのペーストの中で最も高い強度を示すだけでなく、最低せん断強度が20MPaであり、全てのサンプルが当研究室で目標としているせん断強度(20MPa)を満たしている。故に、最適なPEG分子量と配合比をそれぞれPEG300、12wt.%とする。

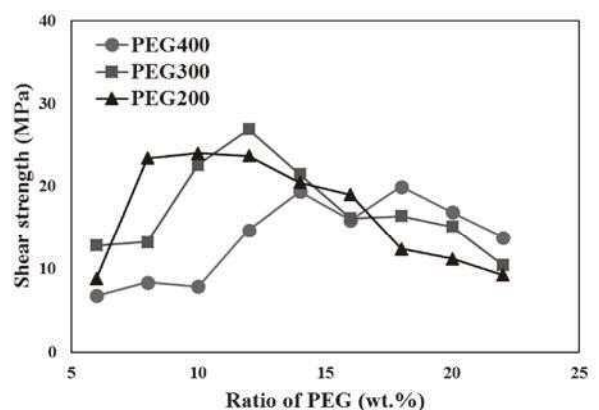


図4 溶媒配合比に伴うせん断強度変化

3.2 接合温度の精査

より低温で同等、あるいはそれ以上の接合強度を実現するため、溶媒条件を最適化したペーストを用いて、加熱温度変化に伴うせん断強度の変化を調査する。酸素雰囲気とN₂雰囲気下で、加熱温度を変化

させて作製した接合サンプルをせん断試験した結果を図5に示す。ギ酸雰囲気下では加熱温度300℃で34 MPa、N₂雰囲気下では加熱温度250℃で33 MPaの最大せん断強度を示すことが確認できる。ギ酸雰囲気下では、プロセス雰囲気が常に還元状態にあり、プロセス中のCuの酸化を無視できるため、加熱温度が高くなるのに従って接合強度も増加すると考えられる。一方で、N₂雰囲気下では、250℃の加熱したサンプルが、300℃で加熱したサンプルより高いせん断強度を示した理由として、Cuの酸化が挙げられる。焼結前のCuペーストとN₂雰囲気下にて250℃、300℃で焼結したサンプルの焼結体をXRDにて元素分析した結果を図6に示す。焼結前のサンプルでは、純Cuのピークのみならず、初期酸化層と考えられるCuOのピークが確認できる。250℃で加熱したサンプルではCuOのピークが消失し、Cuのピークのみが確認できる。300℃で加熱したサンプルでは、Cuのピークに加えて、CuOのピークが確認できる。このことから、TG/DTA測定結果より確認できたCOとCuOの還元反応が250℃近辺で生じ、300℃近辺で再びCuの酸化が進行していると考えられる。従って、ペーストの加熱温度を精査することで、Cuの酸化を抑制できるだ

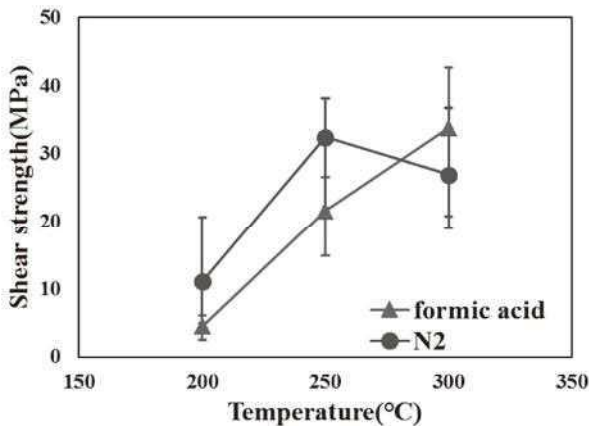


図5 加熱温度に伴うせん断強度変化

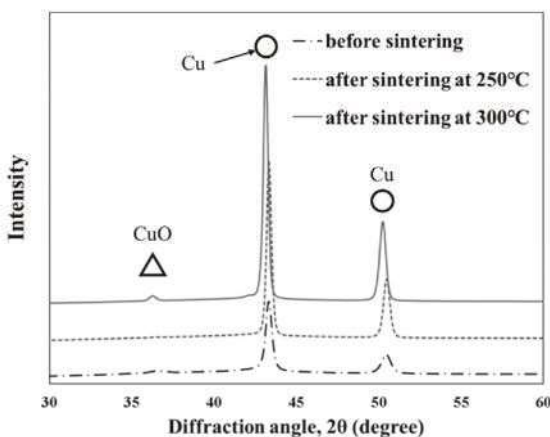


図6 各加熱温度における焼結体の元素分析結果

けでなく、還元雰囲気を用いずとも還元雰囲気下と同等の接合強度を実現できることが明確になった。

3.3 Cuペーストのダイアタッチ特性

最後に、溶媒条件と接合温度を精査したCuペーストのダイアタッチ特性を従来のはんだ接合と比較評価する。高耐熱プリント配線基板にCuペーストを各加熱温度で焼成したサンプルの体積抵抗率を測定した結果を図7に示す。窒素雰囲気下にて250℃で焼成したサンプルの体積抵抗率は、 $9.6 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ とバルクの約5倍の体積抵抗率を示すことが確認できる。この体積抵抗率は、他の加熱温度に比べて僅かに高いが、従来のPb-Sn系はんだの体積抵抗値 ($2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$) と比較すると半分以下の抵抗値に値する。

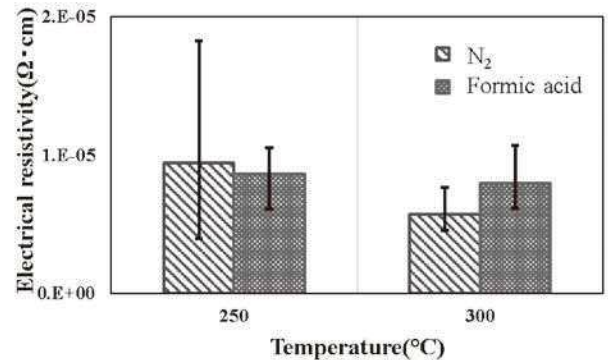


図7 加熱温度に伴う体積抵抗率変化

図8に温度サイクルに伴う熱抵抗値測定結果、図9に温度サイクル試験前後の断面構造の観察結果を示す。1000サイクル後のサンプルには、熱抵抗値、断面構造ともに試験前のサンプルに比べて、顕著な劣化挙動は確認できず、接合層は非常に安定していると言える。以上の実験結果から、本研究で開発したCuペーストは、電気抵抗値、および高温下における長期寿命特性において、従来のはんだ接合に比べて遥かに優れたダイアタッチ特性を有する。

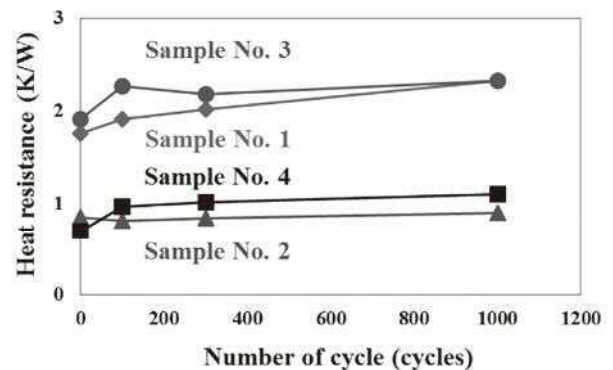


図8 温度サイクル試験による熱抵抗値変化

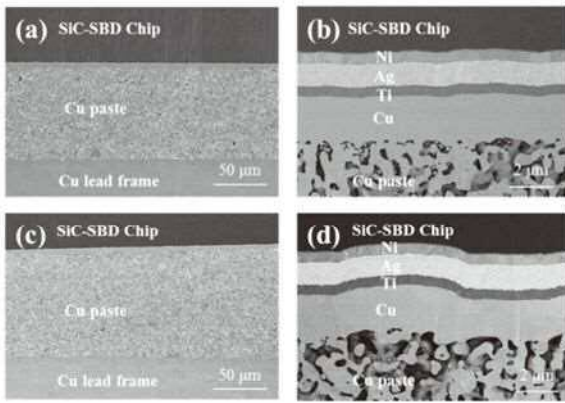


図9 温度サイクル試験前後の断面構造変化
(a,b : サイクル試験前、c,d : 1000サイクル後)

4 結言

Cuサブマイクロ粒子に対してポリエチレングリコールを溶媒として選定し、Cuペーストを作製することで、本研究結果より以下の知見が得られた。

- 1) 溶媒にPEG300を選定することで、加熱プロセス中に溶媒が完全に気化せず還元し、溶媒の残渣を最小限に抑制できる。
- 2) 溶媒条件と接合温度を精査することで還元雰囲気を用いず、還元雰囲気下と同等の接合強度を実現することが可能である。
- 3) 最適化後のCuペーストは電気抵抗値・耐熱性ともに従来のはんだ接合より良好で、優れたダイアタッチ特性を有する。
- 4) 本研究結果より、Cu焼結接合をサブマイクロ粒子において実現できると結論できる。

参考文献

1. T. Kimoto, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 54, 040103, 2015
2. J.D. Van Wyk, and F.C. Lee, Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99. 30th Annual IEEE, Vol. 1, 1999, pp. 3-12
3. T. Maeda, Y. Kobayashi, Y. Yasuda, and T. Morita, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 17, No. 7, 2012, pp. 556-563
4. H. Nishikawa, T. Hirano, T. Takemoto, and N. Terada, The Open Surface Science Journal, Vol. 3, 2011, pp. 60-64
5. T. Ogura, T. Yagishita, S. Takata, T. Fujimoto, and A. Hirose, Materials Transactions, Vol. 54, No. 6, 2013, pp. 860-865
6. T. Sugioka, S. Nagao, S. Ogawa, T. Fujibayashi, Y. Sumida, Z. Hao, K. Suganuma, IEEE NANO 2016, 2016, pp. 184-187
7. 下山 章夫, 長尾 至成, 菅沼 克昭, エレクトロニクス実装技術, 第32巻, 12号, 2016



勤務先: 株式会社デンソー
今後は、半導体実装技術に関する業務に従事する予定